

光折变晶体四波混频在图象实时 加减及动态追迹显示中的应用

尚庆虎 于美文*

(电子科学研究院, 北京)

摘要: 本文提出了利用两个四波混频相位共轭反射镜的Michelson干涉仪系统进行图象加、减、图象强度反转以及动态追迹显示的理论依据和实验方案, 并获得了理论分析与实验现象一致的结果, 证明了这种方法的可行性。

**Application of FWM photorefractive crystals in image real-time
addition, subtraction and dynamic tracking display**

Shang Qinghu, Yu Meiwen*

(China Academy of Electronics and Information Technology)

Abstract: The theory analysis and experimental set-up of the optical image addition, subtraction, intensity inversion and dynamic tracking display are presented. The experimental set-up is a Michelson interferometer containing two four-wave-mixing phase conjugate mirrors. The experimental results are well accordant with the theory analysis.

* 北京理工大学光学系。(Beijing Institute of Technology).

通过选择高纯度的氧化物膜料, 器件经过严格的清洗和干燥, 适当改进镀制工艺和成膜后一定温度下较长时间的热处理, 可在KTP倍频器件上获得光学性能优越的双波长增透膜。

参 考 文 献

- [1] 吴周令, 范正修, 唐晋发. 光学薄膜吸收损耗的研究. 光学学报, 1989; 9(8):741
- [2] 金林法, 章宏芬, 杨本祺. 用于激光器的某些氧化物薄膜折射率的研究. 中国激光, 1984; 11(4):235

作者简介: 刘训民, 男, 1958年10月出生。助工。现从事光学晶体 (主要是激光晶体) 表面增透膜的研究。

张爱荣, 女, 1942年1月出生。实验师。现从事激光晶体增透膜的研究。

收稿日期: 1990年5月25日。

实时图象处理是光学信息处理的极其重要的组成部分，它具有处理速度快，简便省时等特点。其中图象的加、减等处理都由于其特殊用途日益受到重视。1975年Ebersol对传统图象相减法做了综述分析^[1]，这些方法或是处理过程复杂，难以实时观测，或是需要加液门等附加元件以消除图片厚度不均匀对输出图象的影响。近年来，Ewbank, Chiou和Anderson等人又提出并相继发展了利用自泵浦相位共轭镜实现实时图象相减的方法^[2-4]。

本文提出利用光折变晶体简并四波混频相位共轭技术实现图象相加、相减及动态追迹显示的方法，并做了比较全面的理论分析和实验验证。利用光响应时间不同的晶体可实现不同的图象处理的目的，如利用响应时间极短的BSO晶体，可以作实时图象加、减。利用LiNbO₃:Fe晶体等响应时间较长的晶体，可以对图象突变进行追迹显示，即实时显示出输入图象的变化部分。

一、理 论 分 析

1. 图象相加与相减

在图1所示的图象加减及动态追迹显示原理示意图中，复振幅为A的平行光入射。BS为分束镜，T₀、T₁、T₂分别为待处理图象（如透明图片等的图象），设其复振幅透射系数和光强透过率分别为τ₀(x,y)、τ₁(x,y)、τ₂(x,y)和T₀(x,y)、T₁(x,y)、T₂(x,y)。在两支光路中分别放入透明图片T₁和T₂，其位置到BS的距离相等，PCM₁、PCM₂是两个简并四波混频共轭反射镜，其复振幅反射系数为ρ₁、ρ₂，到BS的距离分别为l₁和l₂，L为成象透镜，P为观察屏。以r、τ和r'、τ'代表BS两侧入射时的复振幅反射和透射系数。则PCM₁和PCM₂两支光路经BS合象后在观察屏P上的输出光波复振幅可分别写为（不考虑成象透镜的放大率）

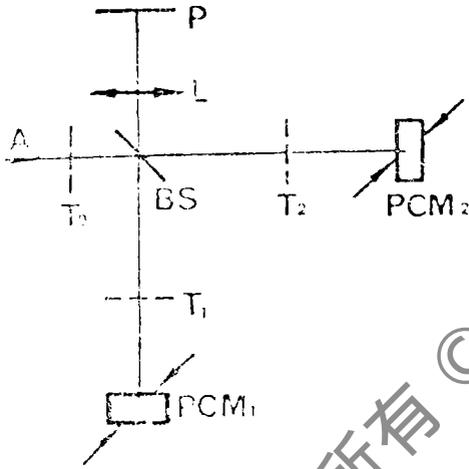


图1 图象加减及动态追迹显示原理示意图

$$\tilde{O}_1(x,y) = A [\tau e^{ikl_1} \tau_1(x,y)]^* \rho_1 \tau_1(x,y) e^{ikl_1} \tau = Ar^* \tau \rho_1 T_1(x,y) \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \tilde{O}_2(x,y) &= A [\tau e^{ikl_2} \tau_2(x,y)]^* \rho_2 \tau_2(x,y) e^{ikl_2} r' \\ &= Ar' \tau^* \rho_2 T_2(x,y) \end{aligned} \tag{2}$$

输出光波光强分布可写为

$$\begin{aligned} I(x,y) &= | \tilde{O}_1(x,y) + \tilde{O}_2(x,y) |^2 \\ &= | A |^2 | r^* \tau \rho_1 T_1(x,y) + r' \tau^* \rho_2 T_2(x,y) |^2 \\ &= I_0 RT | \rho_1 T_1(x,y) - \rho_2 T_2(x,y) |^2 \end{aligned} \tag{3}$$

式中，R = |r|²；T = |τ|²；I₀ = |A|²；并利用反射镜的Stokes^[3]

$$r\tau^* + r'\tau = 0 \tag{4}$$

在四波混频过程中，相位共轭反射系数ρ₁、ρ₂的相位一般与各自的入射泵浦光波相位

之差相同^[5,6]。所以调节泵浦光相位就可以达到改变共轭反射附加相位的目的。设 $\rho_j = |\rho_j| e^{i\phi_j}$, ($j=1,2$), 那么, $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$, 就决定了(3)式中 T_1 、 T_2 的关系。

当 $|\rho_1| = |\rho_2|$ 时, 若 $\Delta\phi = 2m\pi$, ($m = \pm 0, 1, 2, \dots$), 则

$$I(x, y) = I_0 RT |\rho_1|^2 \cdot |T_1(x, y) - T_2(x, y)|^2 \quad (5)$$

输出图象为两输入图象透过率 T_1 、 T_2 的相减结果。如果 $\Delta\phi = (2m+1)\pi$, 则

$$I(x, y) = I_0 RT |\rho_1|^2 \cdot |T_1(x, y) + T_2(x, y)|^2 \quad (6)$$

输出图象为两输入图象透过率 T_1 、 T_2 相加的结果。一般

$$I(x, y) = I_0 RT |\rho_1|^2 \cdot |T_1(x, y) - T_2(x, y) e^{i\Delta\phi}|^2 \quad (7)$$

不再是简单的加减关系了。

在上述图象相加、相减的分析过程中可以看出, 输出图象与输入图象的相位分布无关, 所以被处理透明图片一般无需放在液门中。图片的相位噪声及系统中光学元件象质不影响输出光强分布。这是与传统图象相减不同之处, 也是利用相位共轭镜作图象相减的特点之一。利用BSO等快速响应的光折变晶体就可实现实时图象加减。

2. 两可变图象差异比较的动态显示

如果 PCM_1 和 PCM_2 利用的光折变晶体介电弛豫时间较长, 光强分布在晶体内的记录和擦除也就需要一段较长时间才能完成。那么在 $\Delta\phi = 2m\pi$ 的图象相减情况下, 如果一支光路中的图象 T_1 或 T_2 复振幅透过系数快速变化 (变化时间 \ll 晶体介电弛豫时间 T_0), 则输出图象中相应位置处会出现亮图案。如果两图象都变化, 那么变化相同部分的输出为暗场, 而变化不同部分输出亮图象, 从而可实现两变化图象的差异比较动态显示。设 T_j 发生突变成为 T_j' ($j=1, 2$) 这时相当于 PCM_j 的入射探测物光波改变, 新入射光强分布将擦除晶体对 T_j 的记忆并使之逐渐记录下 T_j' 的信息从而产生相应的新的共轭光波。我们假定 PCM_j 上的总入射光强基本不变 (这对相位突变或小范围振幅突变都成立)。

利用四波混频动态特性^[7]可以得到共轭反射镜记录和擦除时相应的复振幅反射系数 $\rho_r(t)$ 和 $\rho_e(t)$ 随时间变化关系

$$\rho_r(t) = \rho_\infty F(t) \approx \rho_\infty (1 - e^{-t/T_0}) \quad (8)$$

$$\rho_e(t) = \rho_0 e^{-t/T_0} \quad (9)$$

式中, t 为记录或擦除时间; $\rho_0 = \rho_e(t=0)$; $\rho_\infty = \rho_r(t \rightarrow \infty)$; 那么当两图象 T_1 和 T_2 分别变为 T_1' 、 T_2' 时

$$\begin{aligned} I_0(x, y, t) &= I_0 \left| [r e^{ikl_1} \tau_1(x, y)] * \rho_{1e}(t) \tau_1'(x, y) e^{ikl_1 \tau} \right. \\ &\quad + [r e^{ikl_1} \tau_1'(x, y)] * \rho_{1r}(t) \tau_1(x, y) e^{ikl_1 \tau} \\ &\quad - [\tau e^{ikl_2} \tau_2(x, y)] * \rho_{1e}(t) \tau_2'(x, y) e^{ikl_2 r'} \\ &\quad \left. - [\tau e^{ikl_2} \tau_2'(x, y)] * \rho_{1r}(t) \tau_2(x, y) e^{ikl_2 r'} \right|^2 \\ &= I_0 RT \left| \rho_{10} e^{-t/T_{10}} \tau_1 * \tau_1' + \rho_{1\infty} (1 - e^{-t/T_{10}}) T_1' \right. \\ &\quad \left. - \rho_{20} e^{-t/T_{20}} \tau_2 * \tau_2' - \rho_{2\infty} (1 - e^{-t/T_{20}}) T_2' \right|^2 \quad (10) \end{aligned}$$

$t \rightarrow \infty$ 时, $I(x, y, \infty) = I_0 RT |\rho_{1\infty} T_1' - \rho_{2\infty} T_2'|^2$ 。取 $\Delta\phi = 2m\pi$, $T(x, y) = 1$, $|\rho_{10}|$

$= |\rho_{1\infty}| = |\rho_{20}| = |\rho_2|$ ，并且 $T_{10} = T_{20}$ ，输出光强度分布为

$$I_0(x, y, t) = I_0 RT |\rho_{1\infty}|^2 \cdot |(\tau_1 * \tau_1' - \tau_2 * \tau_2') e^{-t/T_{10}} + (T_1' - T_2') (1 - e^{-t/T_{10}})|^2 \quad (11)$$

当变化开始 ($t \ll T_{10}$) 时,

$$I(x, y, 0^+) = I_0 RT |\rho_1| |^2 \cdot |\tau_1 * \tau_1' - \tau_2 * \tau_2'|^2$$

当稳态 ($t \gg T_{10}$) 时,

$$I(x, y, \infty) = I_0 RT |\rho_{1\infty}|^2 \cdot |T_1' - T_2'|^2 \quad (12)$$

可见输出图象在变化开始时反映出两图象间这种变化的差异来，而时间较长时，输出图象就成了新的图象相减结果了。

为简单计，我们认为 T_2 不变，而只有 T_1 变化：

1. 当 T_1 只有相位突变时，这时光强透过率不变， $T_1(x, y) = T_1'(x, y) = T_2(x, y)$ ，以 $\phi_1(x, y)$ 、 $\phi_1'(x, y)$ 分别表示 τ_1 、 τ_1' 的相位。由 (11) 式得输出图象

$$\begin{aligned} I(x, y, t) &= I_0 RT |\rho_{1\infty}|^2 \cdot |T_1|^2 e^{-t/T_{10}} e^{i\Delta\phi} + (1 - e^{-t/T_{10}}) - 1|^2 \\ &= I_0 RT |\rho_1 T_1|^2 e^{-2t/T_{10}} |1 - e^{i\Delta\phi(x, y)}|^2 \\ &= I_0 RT |\rho_1|^2 e^{-2t/T_{10}} [1 + \cos\Delta\phi(x, y)] T_1^2 \quad (13) \end{aligned}$$

式中， $\Delta\phi(x, y) = \phi_1'(x, y) - \phi_1(x, y)$ 代表图象的相变前后相位差。可见当图象(或物体)的相位发生突变时，输出场中反映出这种变化，如果 $\Delta\phi < \pi$ ，变化处为亮条纹，如果 $\Delta\phi > \pi$ 则在相应处出现明亮相间的图案，而其余部分为暗背景，这些图案随时间按指数规律渐渐消失。

值得指出的是，利用这种方法也可以测量相位物体的相位分布不均匀性，它也是一种二次曝光干涉法，即 $T_1 = 1$ ，在第一次曝光时光路中不放物体，共轭反射基本稳定后，快速放入被测物体，那么由 (13) 式可见就会在输出屏上出现相应的干涉条纹， $\Delta\phi(x, y)$ 就是物体相位分布。而且若进行干涉计量，无需调节 $\Delta\phi$ 即两个 PCM 的附加相位差。对不同值的 $\Delta\phi$ ，干涉条纹有一平移，不影响最终测量结果。

2. 如果 T_1 只有振幅变化，相位不变，(11) 式就可写为

$$I(x, y, t) = I_0 RT |\rho_{1\infty}|^2 \cdot |e^{-t/T_{10}} \sqrt{T_1 T_2'} - (1 - e^{-t/T_{10}}) T_1' - T_2|^2 \quad (14)$$

为了便于说明问题，进一步认为在光路中不放图片且混频过程稳定时，突然在 PCM₁ 光路中放入图片 T_1' ，则由于 $T_1(x, y) = T_2(x, y) = 1$ ，(14) 式为

$$I(x, y, t) = I_0 RT |\rho_{1\infty}|^2 \cdot |e^{-t/T_{10}} \sqrt{T_1'} + (1 - e^{-t/T_{10}}) T_1' - 1|^2 \quad (15)$$

当 $t \ll T_{10}$ 时

$$I(x, y, 0^+) = I_0 RT |\rho_{1\infty}|^2 |1 - \sqrt{T_1'}|^2 \quad (16)$$

这时输出图象为输入图象的衬度反转象，但是反转是非线性的。当 $T \gg T_{10}$ (即 $t \rightarrow \infty$) 时，(15) 式为

$$I(x, y, \infty) = I_0 RT |\rho_{1\infty}|^2 \cdot |1 - T_1'(x, y)|^2 \quad (17)$$

输出亦是衬度反转象，即变化部分为亮场。当 PCM₁ 光路中存在图片 T_1 并且共轭达到稳定时，突然取走，相当于 $T_1(x, y) = T_2(x, y) = 1$ 则由 (14) 式得

$$I(x, y, t) = I_0 RT |\rho_{1\infty}|^2 e^{-2t/T_{10}} |1 + \sqrt{T_1}|^2 \quad (18)$$

那么相应位置处的亮场随时间按指数规律渐渐衰减最后完全消失。

由(12)式~(18)式可以看出,若在 T_1 光路中存在一运动物体,则在它的运动过程中,输出光场就会显示出它不同的位置(亮图案),并且随时间渐渐消失。或者说相应其运动路径,输出场中显示出其亮的运动轨迹,该轨迹亮线在离物体越近处越亮,越远越弱。从而可实现动态目标的动态追迹显示。

二、实验结果

图2是实现图象相加、相减及动态追迹显示的实验光路。BS₁、BS₂和BS₃是分束镜, M₁、M₂、M₃、M₄是平面反射镜, L_j (j=1,2,3,4,5)是透镜。其焦距分别是 $f_1' = 5\text{mm}$, $f_2' = 180\text{mm}$, $f_3' = f_4' = 600\text{mm}$, $f_5' = 340\text{mm}$, PCM₁、PCM₂是简并四波混频实现的相位共轭镜, P为观察屏。

1. 当做图象的实时加减时,是由Ar⁺激光器的488nm光照明, PCM₁、PCM₂所用光折变晶体为BSO,其厚度为2mm,并在<110>方向上施加约6kV/cm的电压。由于BSO晶体的光电响应时间 T_0 在毫秒级,故可认为在一般情况下,人眼看清图象所需时间远比 T_0 大,即观察到的输出都是共轭稳态下的情况。调节M₂的倾斜度及前后位置,使两输出光波为相消干涉(即 $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = 2m\pi$)。由于光学元件质量以及两块记录用光折变晶体上所加的泵浦光波对不完全共轭等因素的影响,导致共轭反射光波不完全与相应的入射探测光波共轭,从而不能完全消除系统象差的影响,这时相消干涉只发生在输入图象的局部。而微量调节M₂使输出为亮场时,输出为图象相加结果。图3a、图3b就是图象的相加、相减实验结果。两原图象分别是水平和垂直的透明狭缝。

2. 当进行图象动态比较差异显示时,用He-Ne激光照明图2系统,光折变晶体均为LiNbO₃:Fe晶体,掺铁0.1mol%,厚度为

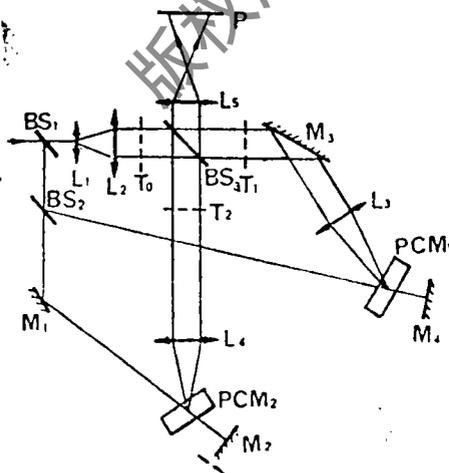


图2 图象加减及动态追迹显示实验光路示意图



图3 图象相加(a)和相减(b)的实验结果

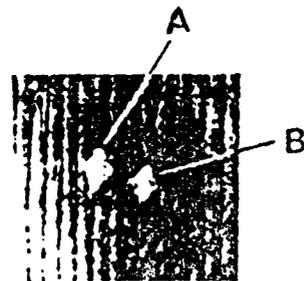


图4 图象突变的动态显示

0.5mm。在实验中PCM₂光路中不放图片(即 $T_2=1$),而在PCM₁光路中有一运动目标。图4是两图象比较的差异动态追迹显示的实验结果照片。不透明图象(棱形)从A处移到B处时,输出场相应位置均出现亮图案。当目标图象不再变化后,A处亮图案逐渐减弱最后消失。当相位物体变化时,同样出现类似现象,但是B处的图案也随时间减弱逐渐消失。并且各图案上有明暗相间条纹,而不再是完全的亮斑了。

三、讨 论 与 结 论

利用两个筒并四波混频相位共轭反射镜的相干图象加减法具有连续可调两输入图象的相位差的特点,在同一系统中可方便地实现图象相加、相减及动态追迹显示等。另外,由于利用了共轭法,可自动消除图片相位噪音和系统象差。

图象相减法还可以用于图象衬度反转等。另外,图象动态追迹显示在军事目标的侦察和导弹等飞行轨迹分析、微生物研究等军事、医学、生物学领域及其它科研中具有潜在的应用。

参 考 文 献

- [1] Ebersole J F. Opt Engng, 1975; 14(5): 436
- [2] Ewbank M D, Khoshnevisan M, Feinberg J. Opt Lett, 1985; 10(6): 282
- [3] Chiou A E, Yeh P. Opt Lett, 1986; 11(5): 306
- [4] Anderson D Z, Lininger D M. Opt Lett, 1987; 12(2): 123
- [5] Fischer B, Cronin-Golomb M, White O *et al.* Opt Lett, 1981; 6(11): 519
- [6] Cronin-Golomb M, Fischer B, White J O *et al.* IEEE J Q E, 1984; QE-20(1): 12
- [7] 尚庆虎, 于美文. 筒并四波混频用于光学玻璃不均匀性检测. 北京理工大学学报, 待发表

收稿日期: 1990年3月29日。 收到修改稿日期: 1991年2月4日。

· 简 讯 ·

用二极管端面泵浦Nd:YAG棒输出超过15W

华盛顿州贝尔维尔光谱技术公司(STI)的科学家们用二极管端面泵浦Nd:YAG激光棒产生15W以上的多模连续输出功率。实验表明,斜效率达60%,电效率为10.5%。Steve Tidwell和Jon Seamas使用四个由光谱二极管实验室制作的10W二极管阵列条,采用独特的光耦合端面泵浦方式,得到了这些高效率结果。二极管激光器向Nd:YAG棒的光转换效率超过85%。

据光谱技术公司固体激光器和非线性光学主任Dennis Lowenthal讲,现在采用端面泵浦是因为它的效率高,而且重要的是,确定在什么程度上的端面泵浦刚好使平均功率按比例地变化。目前,TEM₀₀模的输出功率仅有6W,但研究人员认为:会达到更高的输出功率。用一个重复频率为1~20kHz的声光调制器对这种器件进行Q调制,在20kHz时,多模平均输出功率是10W,脉宽为750ns。

译自L F World, 1991; 27(2):11 邹福清 译 邹声荣 校